

Ce、Cu、Ag合金化对铸造Mg-7Bi合金组织与性能的影响

李万东¹ 左明伟² 丁超群³ 雒新宇¹ 宋晓明¹

(1. 河北石油职业技术大学机械工程系, 承德 067000; 2. 河北石油职业技术大学汽车工程系, 承德 067000; 3. 河北石油职业技术大学数理部, 承德 067000)

摘要 制备了铸态Mg-7Bi、Mg-7Bi-2Ce和Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag合金, 研究合金元素Ce、Cu、Ag添加对铸造Mg-7Bi合金显微组织与力学性能的影响, 利用X射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)等手段对其显微组织及相组成进行表征, 采用拉伸试验获得铸态合金的力学性能, 分析合金元素对铸造Mg-7Bi合金显微组织与力学性能的影响及机理。结果表明, 铸态Mg-7Bi合金由 α -Mg和Mg₃Bi₂相两相组成, 其中Mg₃Bi₂第二相沿晶界连续分布或以块状均匀分布在晶粒内; 添加合金元素Ce、Cu和Ag后, Mg-7Bi合金的晶粒尺寸由88.71 μm 减小至61.76 μm , 且在合金中形成少量的Mg₂Cu和Mg₁₂Ce第二相。依靠细晶强化、第二相强化和固溶强化使得Mg-7Bi合金室温强度显著提升且塑性未出现明显下降。铸态Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag合金的抗拉强度达到169.8 MPa, 伸长率保持在10.54%左右, 强塑积由1 511.9 MPa·%提升至1 789.7 MPa·%, 综合力学性能显著改善。

关键词 Mg-7Bi合金; 合金化; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG146.22; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250133

Effects of Ce, Cu and Ag Alloying on Microstructure and Property of Mg-7Bi Alloy

LI Wandong¹, ZUO Mingwei², DING Chaoqun³, LUO Xinyu¹, SONG Xiaoming¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000;

2. Department of Automotive Engineering, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000;

3. Mathematical-physical Department, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000)

Abstract: As-cast Mg-7Bi, Mg-7Bi-2Ce, Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag alloys were prepared, and the effect of Ce, Cu and Ag addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-7Bi alloy was investigated. The microstructure and phase compositions of the alloys were characterized by XRD, SEM and TEM, and mechanical properties of the alloys were obtained by tensile test. The influence mechanism of alloying elements on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-7Bi alloy were analyzed. The results reveal that the microstructure of as-cast Mg-7Bi alloy consists of α -Mg matrix and Mg₃Bi₂ phase, and the latter is continuously distributed along grain boundaries or uniformly distributed as blocks in grains. With Ce, Cu and Ag addition, the grain size of Mg-7Bi alloy is reduced from 88.71 μm to 61.76 μm , and a small amount of Mg₂Cu and Mg₁₂Ce second phases is also observed. Depending on grain refinement strengthening, second phase strengthening and solid solution strengthening, the tensile strength of Mg-7Bi alloy is increased significantly with stable plasticity. The tensile strength of as-cast Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag alloy reaches up to 169.8 MPa, the elongation remains 10.54%, and the product of strength and elongation is increased from 1 511.9 MPa·% to 1 789.7 MPa·%, indicating the distinct enhancement of comprehensive mechanical properties.

Key Words: Mg-7Bi Alloy, Alloying, Microstructure, Mechanical Properties

镁合金作为最轻的金属结构材料被广泛应用于汽车轮毂、变速箱壳体、座椅骨架等零配件领域, 对于实现节能减排和产品轻量化等方面具有积极意义^[1]。与铝合金、钢铁等其他金属结构材料相比, 强度不够高、

耐腐蚀性能差和耐热性较差是限制镁合金发展的重要因素。目前被报道的AZ系列、AM系列镁合金已经在强度上获得了很大提高^[2-3], 相关铸造合金的抗拉强度可达到190 MPa以上。同时, Mg-Gd、Mg-Sn和Mg-Bi

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2025-04-17

基金项目: 2023年度承德市应用技术与开发暨可持续发展议程创新示范区专项科技计划资助项目(202305B023); 承德市科技计划资助项目(202404B022)

第一作者: 李万东, 男, 1991年出生, 讲师, E-mail: 919634376@qq.com

通信作者: 丁超群, 女, 1993年出生, 讲师, E-mail: 876147403@qq.com

引用格式: 李万东, 左明伟, 丁超群, 等. Ce、Cu、Ag合金化对铸造Mg-7Bi合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 776-781.

LI W D, ZUO M W, DING C Q, et al. Effects of Ce, Cu and Ag alloying on microstructure and property of Mg-7Bi alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 776-781.

系列合金作为耐热镁合金产品近年来受到更多的研究者关注^[4-5],其中 Mg-Sn 和 Mg-Bi 系列合金具有良好的开发前景,成本明显低于 Mg-Gd 等含稀土耐热镁合金。目前,LI X 等^[6]报道了 Mg-6Bi 合金的时效行为,JA E W C 等^[7]也研究了 Mg-5Bi-3Al 合金的显微组织与力学性能。可见高 Bi 含量的镁合金具有较大的开发价值,而作为发动机壳体等耐热部位的潜力轻量化材料,对耐热性能和力学性能的综合性能要求较高,有必要开发一种铸态 Mg-7Bi 合金,并且通过合金化优化显微组织和力学性能,使其适用于大铸件应用场景。

值得关注的是,在 Mg-Bi 合金中容易形成稳定性较强的 Mg₃Bi₂ 相,该第二相的熔点达到 821 ℃^[8],明显高于 Mg₁₇Al₁₂ (432 ℃)、Mg₂Sn (771 ℃) 和 MgZn₂ (413 ℃) 等常见第二相的熔点^[9-10],对于提高 Mg-Bi 合金的耐热性具有重要意义。目前所报道的 Mg-Bi 系列合金强度一般集中分布在 50~150 MPa,伸长率一般不超过 10%,整体上强塑性相对较差^[1,11]。合金化是有效改善合金显微组织和力学性能的重要途径,Al、Zn、Cu、Mn、Zr 等通过固溶强化、细晶强化和第二相强化来提高合金强度^[12-13]。对于开发耐热性较高的 Mg-Bi 合金,添加 Ce 和 Cu 元素进一步形成的 Mg₂Cu 或 Mg₁₂Ce 相也具有较好的耐热性,同时与 Ag 元素共同添加到 Mg-Bi 合金中,可以起到良好的细晶强化效果^[6]。

根据 Mg-Cu、Mg-Ce 二元相图,通过向镁合金中添加(质量分数,下同)2% 的 Ce 和 2% 的 Cu,可以形成熔点分别为 568 ℃、611 ℃的 Mg₂Cu 和 Mg₁₂Ce 第二相,既可形成少量的差异耐热第二相,又达到细化晶粒的效果。Ag 元素添加一般不超过 1%,难以形成第二相,能够发挥 Ag 元素固溶强化和细晶强化效果,且不会因形成 Mg₅₄Ag₁₇ 第二相导致添加的 Ag 元素浪费^[6,14]。本研究通过优化铸造工艺,利用分步添加熔炼合金原材料的手段,开发一种具有优异力学性能的 Mg-Bi-Ce-Cu-Ag 合金,进一步分析合金元素添加对合金显微组织与力学性能的影响,从而为耐热 Mg-Bi 合金的研究提供参考。

1 试验材料及方法

原材料为高纯 Mg 块(>99.95%,质量分数,下同)、高纯 Bi 颗粒(>99.9%)、高纯 Cu 颗粒(>99.9%)、高纯 Ag 颗粒(>99.95%)和 Mg-20Ce 中间合金块,单炉按总质量 0.8 kg 配比称重,合金的实际化学成分(使用 XRF 测得)见表 1。在真空气氛井式电阻炉(TRL-

6JZK-12)中进行熔炼,保护气氛采用体积分数为 99% 的 CO₂ 与 1% 的 SF₆ 的混合气体,熔炼坩埚为低碳钢坩埚。首先将坩埚放入熔炼炉升温至 500 ℃,将 Mg 块和 Mg-20Ce 中间合金块放入坩埚中保温 10 min 完成烘干处理,通入保护气体升温至 720 ℃保温 20 min 完成合金块熔化,将 Bi、Cu 和 Ag 颗粒投入熔化的金属液中,继续升温至 735 ℃保温 20 min,然后降温至 700 ℃,再向熔液中添加除渣剂并搅拌,清理完表面浮渣后,将金属液浇注至预热到 200 ℃的模具中,模具含浇口和冒口的尺寸为 180 mm×120 mm×20 mm。

表 1 Mg-Bi 合金的化学成分
Tab.1 Chemical compositions of Mg-Bi alloys %

编号	w _B				
	Bi	Ce	Cu	Ag	Mg
Mg-7Bi	7.08	—	—	—	余量
Mg-7Bi-2Ce	7.11	1.95	—	—	余量
Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag	7.06	1.98	2.04	0.96	余量

将铸造合金切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的块体进行显微组织测试。使用 DX2000 型 X 射线衍射仪(XRD)进行物相检测,扫描范围为 20°~80°,扫描速度为 6 (°)/min。扫描组织观察试样表面使用 800 号 SiC 砂纸进行终磨,在抛光机上使用丝绒抛光布和金刚石抛光液进行抛光,腐蚀液采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液。使用 S3400N 扫描电镜(SEM)进行形貌及元素分布观察,并用 ImageJ 通过截线法测量平均晶粒尺寸;利用 2100F 透射电镜(TEM)进一步观察第二相形貌、元素分布及原子高分辨结果;拉伸试样示意图见图 1,室温下在微机控制电子万能试验机上以 1×10⁻³ s⁻¹ 的拉伸速度完成拉伸试验,每种合金测试 3 个有效试样,取平均值。

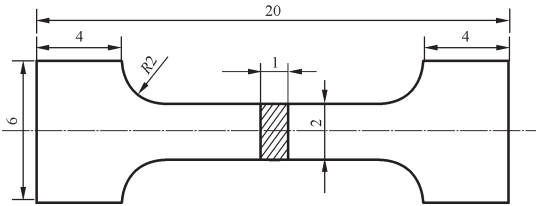


图 1 拉伸试样尺寸示意图
Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen dimension

2 试验结果及分析

2.1 合金元素添加对显微组织影响

铸造 Mg-7Bi、Mg-7Bi-2Ce 和 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的扫描组织见图 2。可以看出,3 种合金均呈现典型的等轴树枝晶组织,测得平均晶粒尺寸分别为 88.71、76.42 和 61.76 μm,可见通过 Ce、Cu、Ag 元素添加可以显著细化晶粒尺寸。同时,发现大量的沿晶界

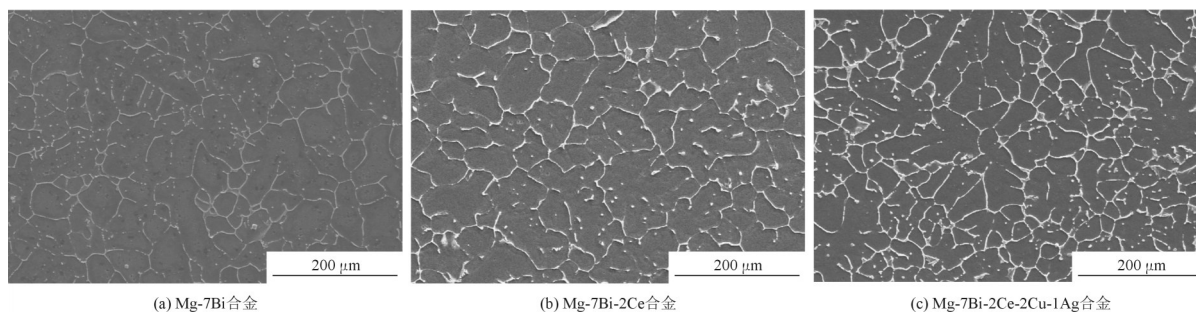


图 2 不同铸造合金的 SEM 组织

Fig.2 SEM microstructures of different alloys

分布的连续第二相与晶内分布的块状第二相,随着合金元素添加,第二相含量有增加的趋势。图 3 为不同合金的 XRD 图谱。可以看出,铸态 Mg-7Bi 合金主要由 α -Mg 基体和 Mg_3Bi_2 相组成;添加 Ce、Cu、Ag 元素后, XRD 结果中出现 Mg_2Cu 的衍射峰及不明显的 Mg_{12}Ce 衍射峰,但未发现含有 Ag 元素的衍射峰。

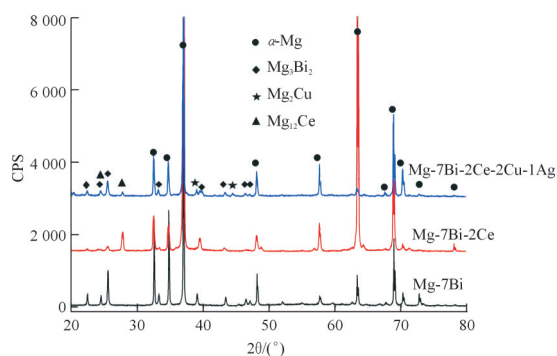


图 3 不同合金 X 射线衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of different alloys

图 4 为铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的显微组织及元素分布结果。可以看出,在晶界处及块状第二相分布的位置,不同程度富集了 Bi、Ce 和 Cu 元素,可以进一步确认铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金中 Mg_3Bi_2 相、 Mg_2Cu 相及少量 Mg_{12}Ce 相的存在。进一步对点 A、B、C 进行元素点扫描,其中点 A 组成为(摩尔分数) 64.62% 的 Mg、31.40% 的 Bi、2.26% 的 Cu、0.79% 的 Ce 和 0.9% 的 Ag,可以确认晶界细小的沿晶第二相主要为 Mg_3Bi_2 相^[15-16];点 B 组成为(摩尔分数) 71.49% 的 Mg、11.27% 的 Bi、2.57% 的 Cu、14.20% 的 Ce 和 0.47% 的 Ag,该位置主要分布了块状 Mg_{12}Ce 和 Mg_3Bi_2 相;点 C 主要组成为(摩尔分数) 84.60% 的 Mg、0.13% 的 Bi、11.66% 的 Cu、3.49% 的 Ce 和 0.12% 的 Ag,该位置可能存在 Mg_3Bi_2 相和 Mg_2Cu 相。另外,由图 4 还可以清晰地发现合金元素除了形成第二相外,仍有一大部分 Bi、Cu、Ce 和 Ag 元素均匀分布在合金中,以单质固溶形式存在。

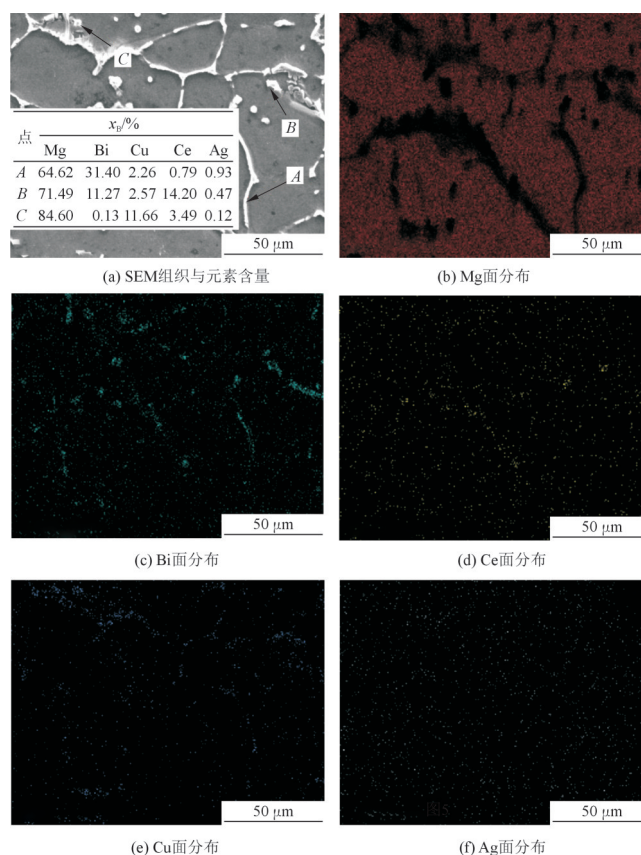


图 4 铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金 SEM 组织及元素分布图

Fig.4 SEM microstructure and element distributions of as-cast

Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag alloy

图 5 和图 6 为铸造 Mg-7Bi 合金和 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金中块状第二相的 TEM 结果。由图 5a~图 5c 可以得出,富集 Bi 元素的第二相在铸造 Mg-7Bi 合金被检测到,并通过图 5e 衍射斑标定结果,确定为 Mg_3Bi_2 相^[17]。图 5f 中测量得出第二相与 α -Mg 基体的 5 倍晶格间距, Mg_3Bi_2 相的晶格间距为 0.421 9 nm, α -Mg 基体的晶格间距为 0.234 4 nm,两者界面的晶格错配度较大^[18]。从图 6 可以看出,存在 Bi、Cu、Ce 及少量 Ag 元素富集的区域,推测该位置为优先形核的位置,形成了明显的 Mg_3Bi_2 、 Mg_2Cu 和 Mg_{12}Ce 第二相,与 XRD 和 SEM 结果一致。

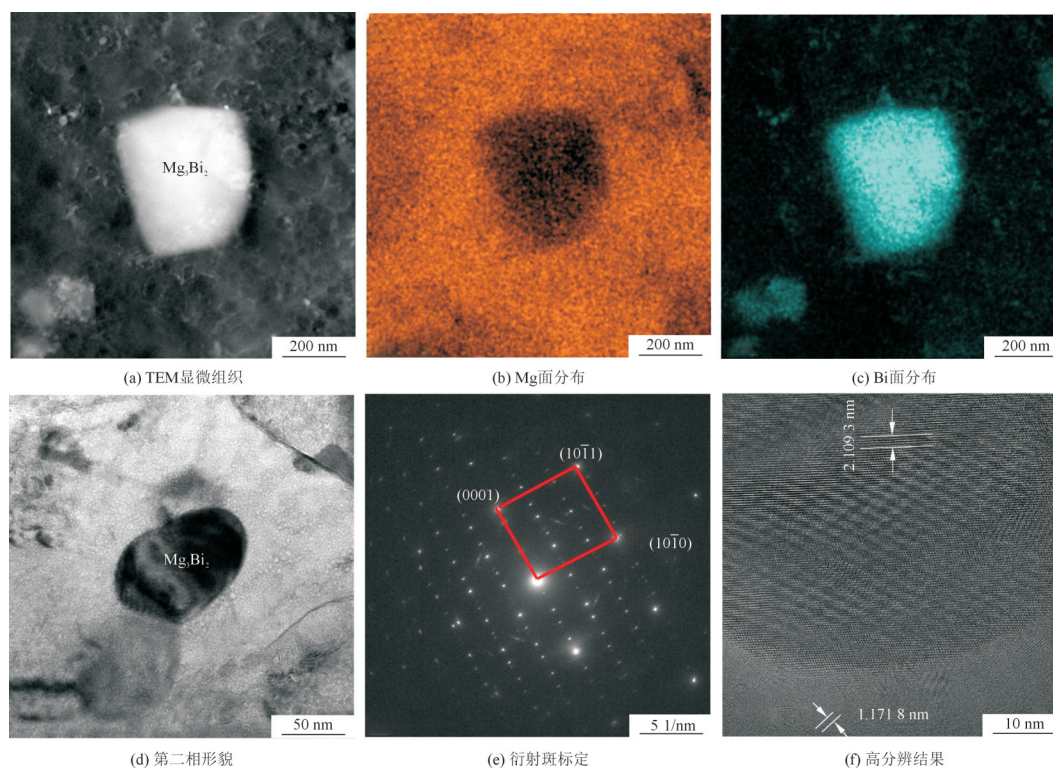


图5 铸造 Mg-7Bi 合金 TEM 测试结果

Fig.5 TEM results of as-cast Mg-7Bi alloy

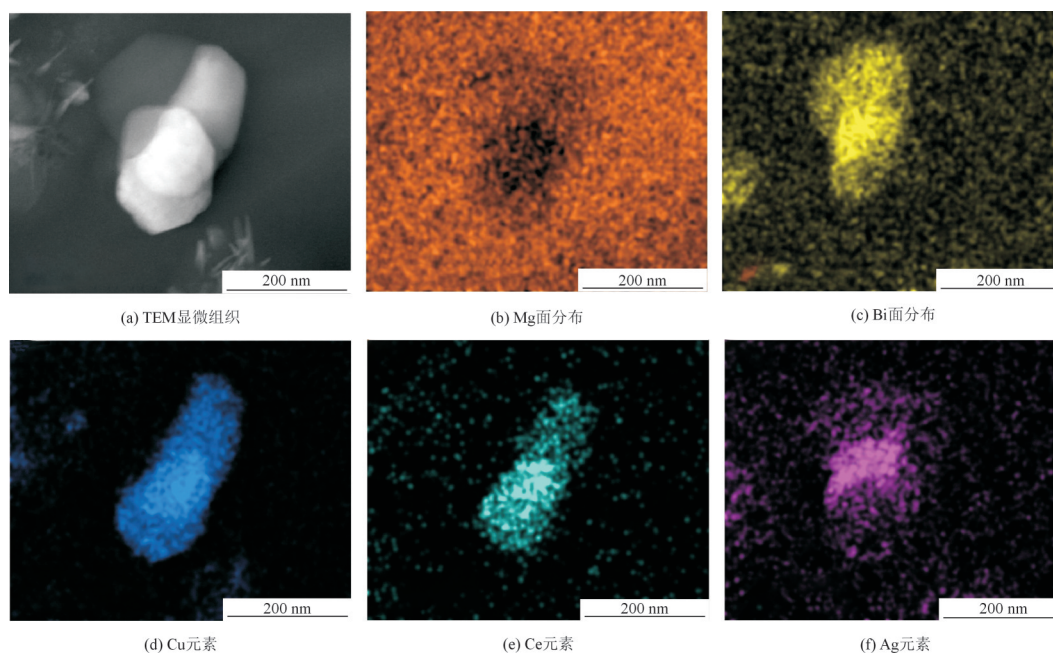


图6 铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的 TEM 形貌及元素分布结果

Fig.6 TEM morphologies and corresponding element distributions of as-cast Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag alloy

2.2 合金元素对 Mg-Bi 合金室温铸态力学性能影响

图7为不同 Mg-Bi 合金的工程应力-应变曲线,所测得的平均晶粒尺寸和力学性能见表2。可以看出,不同合金的拉伸曲线整体规律一致,添加合金元素后合金强度和塑性有较大变化。Mg-7Bi 合金的室温抗拉强度仅为 130.9 MPa,伸长率为 11.55%;添加(质量分数)

2% 的 Ce 后合金的抗拉强度提高至 149.1 MPa,进一步添加 2% 的 Cu 和 1% 的 Ag 后合金的抗拉强度提高至 169.8 MPa,且伸长率仍然保持在 10.54%。Ce、Cu 和 Ag 元素同时添加使得铸造 Mg-7Bi 合金的强塑积由 1 511.9 MPa·% 提升至 1789.7 MPa·%,综合力学性能改善效果显著。

综上,合理的合金元素添加有效实现了晶粒细化、

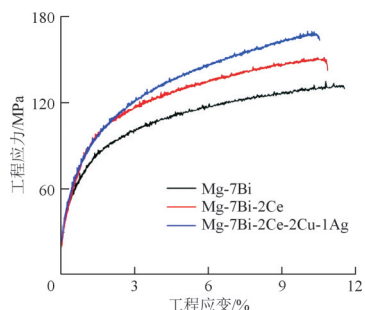


图7 不同铸造合金拉伸过程的工程应力-应变曲线

Fig.7 Tensile engineering stress-strain curves of different as-cast alloys

表2 不同铸造合金的平均晶粒尺寸及力学性能

Tab.2 Average grain size and mechanical properties of different as-cast alloys

合金	平均晶粒尺寸/ μm	抗拉强度/ MPa	伸长率/%	强塑积/ $\text{MPa}\cdot\%$
Mg-7Bi	88.71 ± 2.8	130.9 ± 4.5	11.55 ± 0.41	1 511.9
Mg-7Bi-2Ce	76.42 ± 3.1	149.1 ± 6.2	10.89 ± 0.28	1 623.7
Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag	61.76 ± 2.1	169.8 ± 5.9	10.54 ± 0.33	1 789.7

原子固溶和形成第二相的效果^[19],通过多元强化协同效果显著改善合金的力学性能。机理可归于以下几方面。

(1)第二相强化 铸造 Mg-7Bi 合金中形成沿晶界分布与晶内分布的 Mg_3Bi_2 第二相,添加合金元素后,进一步形成少量的 Mg_2Cu 与 Mg_{12}Ce 第二相。外力作用下合金微观组织中发生位错滑移, Mg_3Bi_2 、 Mg_2Cu 与 Mg_{12}Ce 等硬质第二相可以对位错的运动产生阻碍作用,位错绕开或者切割第二相均产生额外的变形抗力,使得继续变形时需要更大的外力^[20],从而提高合金强度。尤其是 Cu 和 Ce 的引入,形成与 Mg_3Bi_2 差异的第二相,可以更好实现第二相强化效果,避免过量粗大的单一第二相存在。大量位错堆积在第二相的位置,使得过早产生裂纹,导致合金塑性略微降低。另外,第二相与基体的晶格参数差异较大,导致晶格错配度较大,位错在基体与第二相界面处滑移困难,也是导致合金强度提升的重要因素之一。

(2)细晶强化 根据经典的 Hall-Petch 关系,镁合金的屈服强度与晶粒尺寸满足以下关系^[21-22]:

$$\sigma_{0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{0.2}$ 为合金的屈服强度; d 为平均晶粒尺寸; σ_0 和 k 为常数。可见屈服强度随着合金平均晶粒尺寸的减小而增加,铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的平均晶粒尺寸 ($61.76 \mu\text{m}$) 明显小于铸造 Mg-7Bi 合金的平均晶粒尺寸 ($88.71 \mu\text{m}$),使得铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金获得更高的抗拉强度,主要原因是晶粒细化导致单

位面积内出现更多晶界,而晶界具有阻碍位错滑移的作用。合金元素添加可以细化晶粒,主要通过元素富集达到阻碍晶粒长大或者扮演异质形核角色^[23-24],细化晶粒效果可以利用生长抑制因子 (Q) 进行解释,公式为:

$$Q = \sum m_i C_{0i} (k_i - 1) \quad (2)$$

式中, m_i 为液相线的斜率; k_i 为平衡分配系数; C_{0i} 是溶质元素 i 的初始浓度,且不同元素添加对于晶粒生长抑制具有累积效果,其中 $m(k-1)_{\text{Cu}} = 5.28$, $m(k-1)_{\text{Ce}} = 2.74$, $m(k-1)_{\text{Ag}} = 3.41$ ^[25],上述元素同时添加对于合金的晶粒细化具有显著效果。同时,樊栋祥等^[26]验证了晶粒细化是同时保证合金强度与塑性的有效途径,所以晶粒细化可以使铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金在获得强度提升的同时,保持优异的塑性。

(3)固溶强化 通过 SEM 和 TEM 元素能谱分析可以得出,除了形成第二相以外,一部分 Cu、Ce 和 Ag 元素以固溶单质的形式存在于 α -Mg 基体中,Ag 元素虽然在异质的位置出现微量富集,但 XRD 难以检测到第二相存在。研究表明,铸造镁合金中添加 1% 的 Ag 元素一般不易形成 Mg-Ag 第二相,但是可以实现显著的固溶强化效果^[6]。Cu、Ce 和 Ag 的原子半径分别为 0.157、0.270 和 0.144 nm,与 Mg 原子半径 (0.172 nm) 存在不同程度的差异,这些固溶元素可以引起晶格畸变或者形成固溶体,无论是以间隙原子还是置换原子的形式存在,都会引起晶格畸变^[27],一定程度上增加位错密度,并在组织中产生较大的内应力,阻碍位错滑移,从而提高铸造 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的强度。

3 结 论

(1)铸态 Mg-7Bi 合金由 α -Mg 和 Mg_3Bi_2 相组成,其中第二相沿晶界连续分布或以块状均匀分布在晶界内。

(2)合金元素 Ce、Cu 和 Ag 添加使得 Mg-7Bi 合金的晶粒尺寸减小,铸态 Mg-7Bi 合金的平均晶粒尺寸为 $88.71 \mu\text{m}$,而 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的平均晶粒尺寸仅为 $61.76 \mu\text{m}$,且在合金中形成了少量的 Mg_2Cu 和 Mg_{12}Ce 第二相。

(3)添加 Ce、Cu 和 Ag 元素,依靠细晶强化、第二相强化和固溶强化使得铸造 Mg-7Bi 合金抗拉强度显著提升且塑性未出现明显降低。铸态 Mg-7Bi-2Ce-2Cu-1Ag 合金的抗拉强度达到 169.8 MPa,伸长率仍然保持在 10.54%,强塑积由 1 511.9 MPa·% 提升至 1 789.7 MPa·%,综合力学性能改善效果显著。

参 考 文 献

- [1] 孟帅举,王孟璐,宋金龙,等.Cu对铸态Mg-Bi-Sn系合金微观组织与力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2024,34(10):3352-3365.
- [2] ZHAO D J, LÜ S L, GUO W B, et al. Effects of $Mg_{17}Al_{12}$ phase on microstructure evolution and ductility in the AZ91 magnesium alloy during the continuous rheo-squeeze casting-extrusion process [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 191: 63-79.
- [3] 樊晓薇,杨俊杰,李尧.Gd和Y对AM60镁合金高温力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2015,35(12):1329-1332.
- [4] ZHANG Q, LI Q A, CHEN X Y, et al. Effect of Sn addition on the deformation behavior and microstructural evolution of Mg-Gd-Y-Zr alloy during hot compression[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A826: 142-146.
- [5] ZHANG A Y, KANG R, WU L, et al. A new rare-earth-free Mg-Sn-Ca-Mn wrought alloy with ultra-high strength and good ductility [J]. Materials Science and Engineering, 2019, A754: 269-274.
- [6] LI X, MAO J, HUANG X F, et al. Effect of Ag addition on the characteristics of precipitates and improving age hardening response of Mg-6Bi alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 194: 112-115.
- [7] JAE W C, SANG C J, JAE G J, et al. Effects of homogenization temperature on microstructure and mechanical properties of high-speed-extruded Mg-5Bi-3Al alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10: 2833-2846.
- [8] LUO Y H, CHENG W L, YU H, et al. Tailoring the microstructural characteristics and enhancing creep properties of as-cast Mg-5Bi-5Sn alloy through Mn addition[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2023, 11: 3350-3361.
- [9] 吴宗钢,韦皓博,陈洁仪,等.Sn影响镁合金显微组织和力学性能的研究现状及进展[J].特种铸造及有色合金,2024,44(3):305-316.
- [10] LI W D, ZUO M W. Microstructure characterization and age hardening response of Mg-8Sn-2Al alloy with Bi, Ag addition[J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109-111.
- [11] 张辉,韩宝,许春香,等.Sn含量对二元Mg-Bi合金显微组织和力学性能的影响[J].铸造,2014,63(11):1138-1141.
- [12] SASAKI T T, ELSAYED F R, NAKATA T, et al. Strong and ductile heat-treatable Mg-Sn-Zn-Al wrought alloys[J]. Acta Materialia, 2015, 99: 176-186.
- [13] LI W D, CHEN L H, FAN Z D, et al. Age hardening response and microstructure of Mg-8Sn-4Al alloy with Ag, Sc addition[J]. Materials Science and Engineering, 2022, A850: 143-146.
- [14] HUANG X F, ZHANG W Z. Improved age-hardening behavior of Mg-Sn-Mn alloy by addition of Ag and Zn [J], Materials Science and Engineering, 2012, A552: 211-221.
- [15] 孟帅举,余晖,崔红卫,等.新型Mg-Bi-Al-Zn变形镁合金的微观组织与力学性能[J].中国有色金属学报,2017,27(5):894-901.
- [16] 周菁菁,杨文朋,陈亮,等.Cu添加对Mg-Bi合金铸态组织和沉淀硬化的影响[J].中国有色金属学报,2023,33(3):689-701.
- [17] WANG Q H, ZHAI H W, LIU L T, et al. Novel Mg-Bi-Mn wrought alloys: The effects of extrusion temperature and Mn addition on their microstructures and mechanical properties [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10: 2588-2606.
- [18] LI W D, DING C Q, WANG X H, et al. The mechanical property and microstructure of extruded Mg-8Sn-4Al alloy with different extrusion and heat treatments [J]. JOM, 2025(77): 2743-2752.
- [19] 孟帅举,肖浩然,刘浩,等.Zr对铸态Mg-6Bi合金微观组织和力学性能的影响[J].铸造,2024,73(8):1096-1102.
- [20] KIM H J, JIN S C, JUNG J G, et al. Influence of undissolved second-phase particles on dynamic recrystallization behavior of Mg-7Sn-1Al-1Zn alloy during low- and high-temperature extrusions [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 71: 87-97.
- [21] YU H H, XIN Y C, WANG M Y, et al. Hall-Petch relationship in Mg alloys: A review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34: 248-256.
- [22] ANDANIM T, LAKSHMANAN A, SUNDARARAGHAVAN V, et al. Estimation of micro-Hall-Petch coefficients for prismatic slip system in Mg-4Al as a function of grain boundary parameters [J]. Acta Materialia, 2022, 226: 117-123.
- [23] BARNETT M R, KESHAVARZ Z, BEER A G, et al. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg-3Al-1Zn [J]. Acta Materialia, 2004, 52: 5093-5103.
- [24] JANG H S, SEOL D, LEE B J. A comparative study on grain boundary segregation and solute clustering in Mg-Al-Zn and Mg-Zn-Ca alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 894: 162-169.
- [25] HAN Q Y. The role of solutes in grain refinement of hypoeutectic magnesium and aluminum alloys [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(7): 1846-1856.
- [26] 樊栋祥,马勤.镁合金细晶超塑性的研究进展[J].热加工工艺, 2019, 48(10): 47-50.
- [27] 陈梦茹,乐泰和,金培鹏.不同铜含量对AE44镁合金组织与性能的影响[J].有色金属工程,2020(5):10(5):17-21.

(编辑:张正贺)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家最新研究成果)



特种铸造及有色合金杂志
(文章动态时刻关注)